

MÉTODOS Y PROCESOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL GRÁFICA DE ELEMENTOS DEL PATRIMONIO CULTURAL. LA IGLESIA DE SANT SEVER DE BARCELONA

Andrés de Mesa Gisbert
Joaquín Regot Marimón
M^a Amparo Núñez Andrés
Felipe Buill Pozuelo

Levantamientos de objetos de interés Patrimonial. Áreas de aplicación

Un “levantamiento” se realiza para poder establecer el conocimiento métrico y formal de un edificio, monumento, yacimiento arqueológico o pieza escultórica. El término levantamiento se utiliza en todas las labores relacionadas con la toma de datos de un objeto más o menos complejo con el fin de obtener su representación gráfica (Cramer, 1986; Almagro, 2004; Buill et al., 2007).

En arquitectura y arqueología los levantamientos son necesarios para conocer el estado del edificio desde un punto de vista amplio y genérico. La representación de un edificio en un modelo, a partir de un proceso sistemático de “levantamiento” es un objetivo prioritario en la catalogación de patrimonio arquitectónico, para poder conocer con el máximo detalle aquellos parámetros que permiten establecer con gran fidelidad las medidas y las formas del objeto que se desea catalogar.

La utilización del escáner láser en los levantamientos de arquitectura, escultura o arqueología

Los levantamientos se pueden realizar mediante técnicas y herramientas tradicionales, es decir, a partir de la elaboración de croquis, bocetos o dibujos que con la ayuda de cintas métricas, plomadas, clinómetros, etc. (Arias et al., 2007; Pavlidis et al., 2007) permiten establecer los datos métricos necesarios para definir y conocer el objeto. Sin embargo, este proceso requiere de mucho tiempo para generar una documentación gráfica que se pueda utilizar en una catalogación precisa de elementos arquitectónicos, arqueológicos o de escultura.

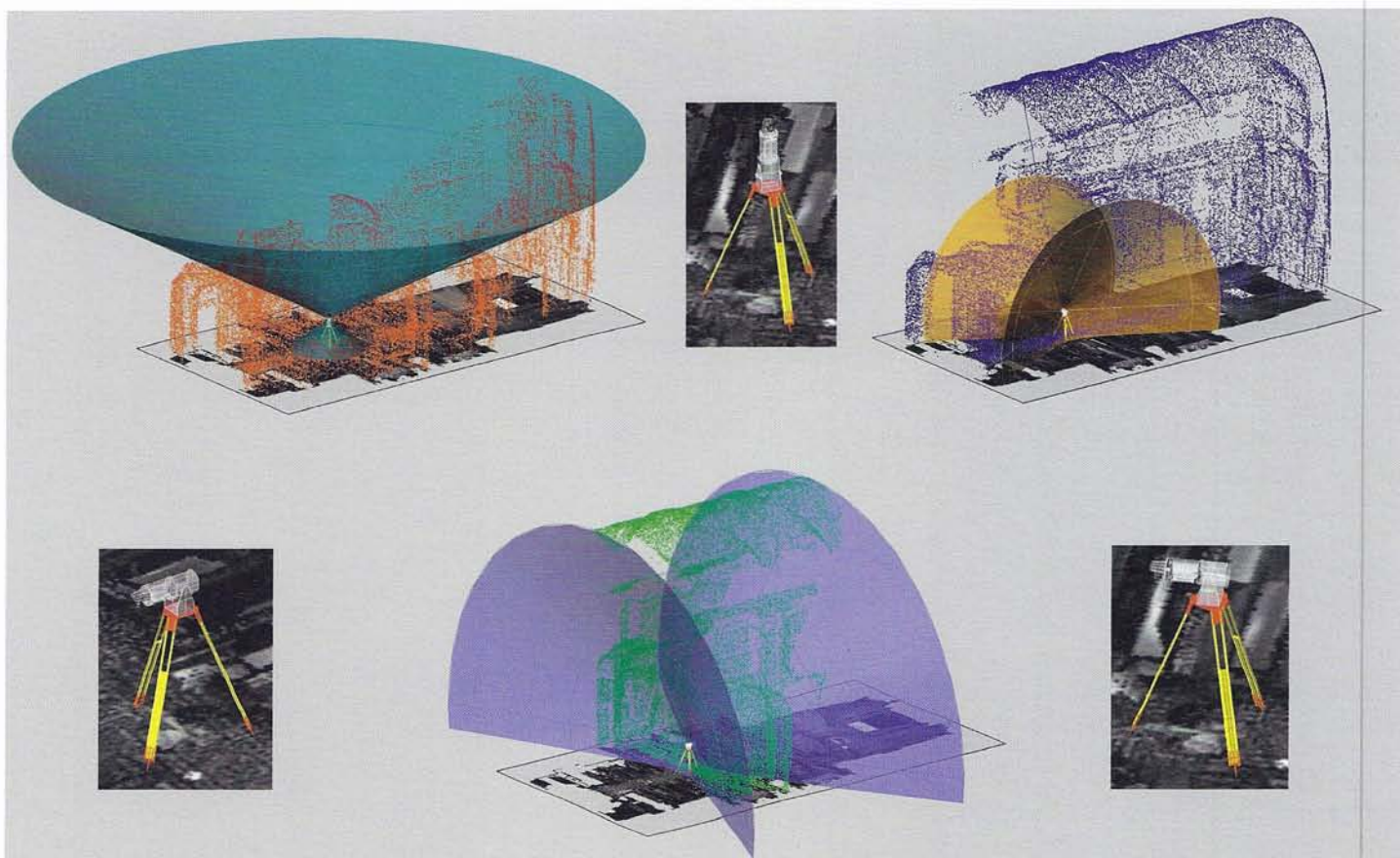
Los instrumentos utilizados en los trabajos de topografía tal como las estaciones totales, han sido instrumentos que han facilitado la labor de levantamiento de edificios y han permitido una mayor precisión métrica. Actualmente, se trata de aparatos que permiten el almacenamiento de las observaciones e incluso incorporar to-

1. Posiciones del escáner y zonas de captura. Barrido con el escáner en posición de eje vertical, en posición de eje trasversal y posición de eje longitudinal. Control de la captura de datos a través de un ordenador portátil.

mas fotográficas y la medida automática de puntos en el área seleccionada por el operario, redundando en el rendimiento y en la eficacia de los trabajos de levantamiento.

La aparición del escáner láser en las tareas de obtención de datos, esta cambiando la manera con la que se vienen desarrollando las técnicas de topografía para el levantamiento terrestre dirigido al campo del urbanismo y el de la arquitectura. Las características más importantes que aportan los sistemas de láser escáner son (Núñez y Buill, 2008):

- La adquisición masiva de datos tridimensionales en poco tiempo; se capturan miles de puntos por segundo.
- Realizan mediciones tridimensionales de alta precisión de largo y corto alcance. Los escáneres terrestres de largo alcance (uso urbano o arquitectónico), permiten realizar mediciones a 400m de distancia con una fiabilidad métrica de desviaciones máximas entre 1 y 2cm. En el caso de escáneres terrestres de corto alcance que emplean el método de triangulación







2. Nubes de puntos capturadas por el escáner y unidas con la misma referencia espacial. Imágenes panorámicas capturadas por la cámara del escáner mostrando el ámbito de captura de dos de los barridos realizados por este instrumento.

óptica, utilizados en la medición de esculturas u objetos pequeños, las precisiones de medida pueden llegar a centésimas de milímetro para una sola toma y décimas de milímetro al unir varias.

- La captura de datos se realiza en la ventana que selecciona el operador. Así mismo se selecciona el paso de malla horizontal y vertical. Todas las medidas quedan referidas a un sistema relativo propio del instrumento para cada estación.
- Para cada punto además de su posición tridimensional (x, y, z) se registra la reflectividad, lo que facilita la clasificación de materiales, y en el caso de disponer de cámara digital su color.

Con estas características, el trabajo de campo no sólo se puede realizar con más agilidad y rapidez, sino que se puede obtener una gran cantidad de información métricamente muy precisa, que si se procesa adecuadamente da como resultado una base gráfica y analítica muy completa del objeto que se ha escaneado.

Metodología de utilización del escáner láser

Este tipo de aparato de medición utiliza la emisión de un rayo láser para poder determinar la posición de los puntos de un objeto en el espacio. El tiempo de respuesta entre el momento de la emisión y la reflexión del rayo láser sobre el objeto al origen del instrumento, permite establecer la distancia y posición del punto escaneado (Baltsavias, 1999). Como en el caso topográfico y fotogramétrico se pro-

ducen obstrucciones que impiden la captura total del modelo. Como consecuencia es necesario realizar la toma de datos, desde diferentes posiciones para poder tener el modelo. A este problema, se le suman las limitaciones del campo "visual" que es capaz de barrer el escáner con el rayo láser. Esta limitación depende del diseño del modelo de escáner que se utilice.

La necesidad de realizar la toma de datos desde diferentes posiciones, con un escáner láser, obliga a tener en cuenta que, para relacionar las nubes de puntos de cada una de las tomas, es necesario establecer unos puntos de referencia en el espacio que puedan ser reconocidos por el instrumento en cada una de las distintas capturas. Estos puntos se consiguen, emplazando unos cilindros o discos reflectantes, (dianas), sobre el espacio que se va a barrer con el láser. Estas posiciones, que necesariamente deben ser comunes para todas las nubes de puntos realizadas, permiten unir diferentes capturas en el post proceso de gestión de datos. La finalidad es obtener un único modelo con toda la información recogida en un sólo conjunto de posiciones 3D.

Aplicación de la técnica de levantamiento con escáner láser en la iglesia de Sant Sever de Barcelona. (Toma de datos)

Para realizar el levantamiento del espacio arquitectónico de los retablos de la iglesia de Sant Sever se utilizó un escáner láser Riegl Z420i capaz de establecer una precisión de 10mm a 50m

de distancia (Riegl, 2008). El campo visual de su sistema láser en capturas con eje de giro vertical es de barrido horizontal completo 360°, y con una amplitud limitada a 80° en barrido vertical (Fig. 1).

Para resolver la obtención de datos del espacio de Sant Sever, teniendo en cuenta la cobertura del haz luminoso del aparato y sus medidas, se estableció un plan de trabajo que consistió en prever 4 bases de posicionamiento del escáner para poder cubrir toda la nave de la iglesia. Se situaron 11 dianas de control, a las que se dio coordenadas mediante una estación total de medida sin prisma en un sistema de referencia establecido para toda la nave. Así mismo se observaron puntos significativos del retablo, que junto con las dianas permitieron la transformación de los diferentes barridos a un sistema de referencia único.

En cada una de las 4 bases de posicionamiento del aparato, se realizaron 3 tomas:

- una primera toma, con el escáner en posición vertical,
- una segunda con el eje del escáner en posición horizontal y coincidente con el eje longitudinal de la nave,
- y una tercera posición con el eje de escáner también en posición horizontal y transversal respecto a la nave de la iglesia (Fig. 2).

En cada posición del escáner se realizó una primera toma de datos con un paso de malla de 0.04m, una segunda toma con una resolución del doble de la anterior, y una tercera toma de detalle correspondientes a los retablos con un paso de malla 0.01m.

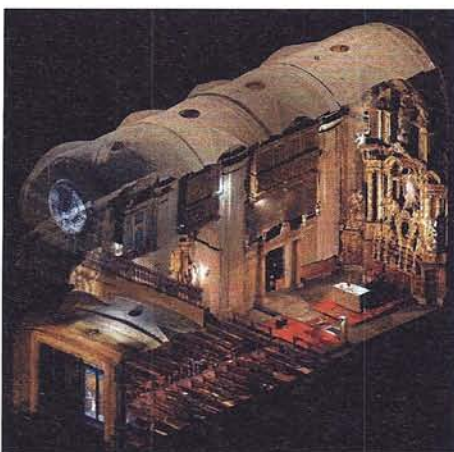
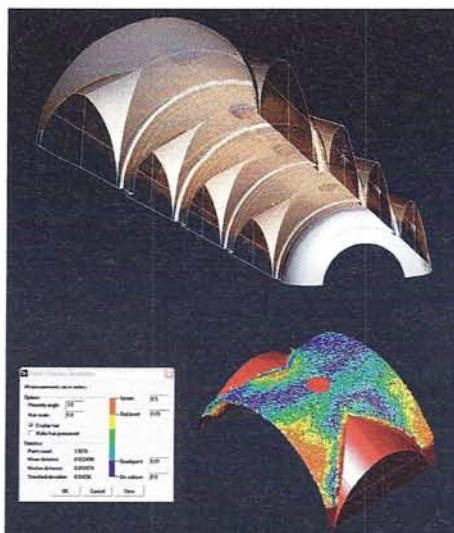
Aplicación de la técnica de levantamiento con escáner láser en la iglesia de Sant Sever de Barcelona. (Estructuración de datos)

La unión de las nubes de puntos obtenidas se puede realizar de diversas maneras. La más habitual, es utilizando dianas de control. Sin embargo, la existencia del pan de oro recubriendo los retablos produce valores de reflectancia similares al de los cilindros de control, por lo que no fue posible la aplicación de esta metodología. Por esta razón, para realizar la unión de los puntos de las diferentes capturas, se utilizó la técnica de orientación tres planos comunes. Esta técnica consiste en tomar una primera nube como referencia respecto a todas las demás, y determinar sobre ella tres planos que luego sean comunes para todas las demás (RG Polyworks, 2008). De esta manera, la referencia común para todas las nubes de puntos se convierte en una caja espacial, que determina, la orientación de las demás mediante los tres planos que la definen. La precisión de todo el conjunto dependerá del número de puntos con el cual se determina cada uno de estos tres planos para cada caso.

Este procedimiento permitió generar las transformaciones precisas de posición y orientación para cada una de las 12 nubes realizadas con un error total s de 9mm para todo el conjunto. De esto modo, se consiguió el modelo espacial completo de Sant Sever con 87215404 de puntos en un mismo sistema coordinado.

La eliminación de puntos redundantes, es decir aquellos que debido a la unión de nubes son coincidentes en

3. Modelado virtual de la bóveda. Comparación entre la nube de puntos y las superficies geométricas que determinan la bóveda. Análisis de los resultados de las desviaciones entre el modelo virtual y la captura de puntos del escáner en un tramo de la bóveda.
4. Modelo del conjunto de capturas de puntos en visión axonométrica tridimensional.



el espacio, es un procedimiento que permite una mayor agilidad en la gestión de los datos. Por otro lado, la selección y clasificación de los datos una vez obtenida la nube final va a permitir establecer la capacidad de representación del modelo tridimensional final y con ello la posibilidad de generar imágenes de todo tipo.

Extracción, utilización y aplicación de la información tridimensional obtenida de la iglesia de Sant Sever de Barcelona

Las aplicaciones que puede tener el uso de la información tridimensional obtenida en la iglesia de Sant Sever mediante un escáner láser pueden ser muy diversas.

Dos son los niveles de definición del modelo tridimensional que se pueden desarrollar a partir de los datos de que se dispone. El primero, es trabajar directamente con un modelo de puntos 3D a partir del ensamblaje de las diversas nubes de puntos obtenidas por los diferentes barridos de escáner (Fig. 3). El segundo, y más óptimo, consiste en materializar cada una de las superficies definida por las distintas posiciones tridimensionales de puntos, hasta conseguir un modelo generado virtualmente ya no por puntos sino por superficies (Fig. 2). Sin embargo, este segundo procedimiento requiere de un tiempo de elaboración mucho más largo. Por otro lado, debido a las características del instrumento con la que se han realizado los barridos de escáner en Sant Sever, este segundo procedimiento no se puede aplicar a los pequeños detalles de las esculturas y de los retablos, pero es perfectamente viable para toda la arquitectura y cualquier objeto de escala mediana.

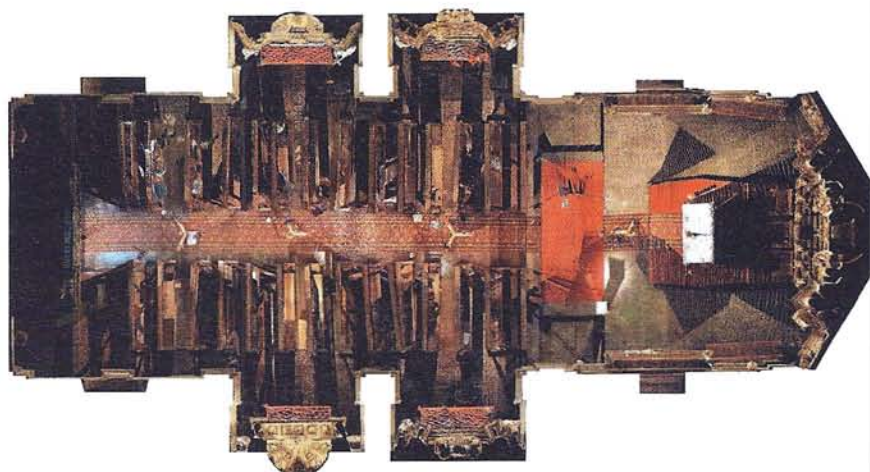
En nuestro caso, a modo de ejemplo, se ha optado por modelar la cubierta, (bóveda) de la iglesia. Para llevar a cabo esta labor se seleccionaron los datos de las nubes de puntos entre la cota 9.15 y 14.50. Esto permitió trabajar con la bóveda en un solo archivo y aplicar los



5. Visualización de datos en proyección ortogonal. Vista desde arriba de una sección que muestra la planta de la iglesia.

6. Visualización de datos en proyección ortogonal. Vista desde abajo de una sección que muestra la bóveda interior de la iglesia.

7. Visualización de datos en proyección ortogonal. Vista desde la derecha de una sección que muestra el alzado lateral izquierdo de la iglesia con dos de los retablos menores.



5

análisis geométricos necesarios de manera unitaria con el fin de obtener los datos de las formas que lo componen.

A partir de las secciones transversales y longitudinales de la bóveda, obtenidas con programas informáticos de gestión de nubes de puntos, se realizó el análisis de las curvas obtenidas para definir las superficies de los arcos formeros y de los lunetos transversales.

Cada uno de los tramos de bóveda se resolvió a partir de la generación de cilindros en el caso de las superficies longitudinales. Para la definición de los lunetos se aplicaron extrusiones sobre los arcos apuntados. La intersección de estas superficies permitió realizar un primer análisis, con programas de CAD. Estas superficies posteriormente se ajustaron métrica y formalmente. De este modo, se pudo conseguir un modelo virtual que permitió establecer el estado de la bóveda del edificio al compararlo con el modelo real (Fig. 3).

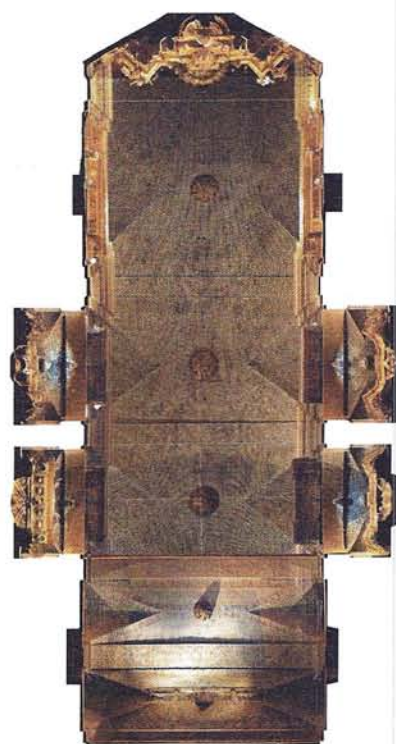
Este trabajo, aún en vías de investigación y desarrollo, pretende mostrar como se puede completar la información que es necesaria, para obtener una catalogación del edificio que sobre todo cuente con la localización y las medidas exactas de todos los elementos que lo componen.

Bien sea a través de la nube de puntos o superficie se obtiene un modelo virtual tridimensional de la iglesia de Sant Sever que contiene una información realmente abundante sobre su forma y el espacio que define. Las dos

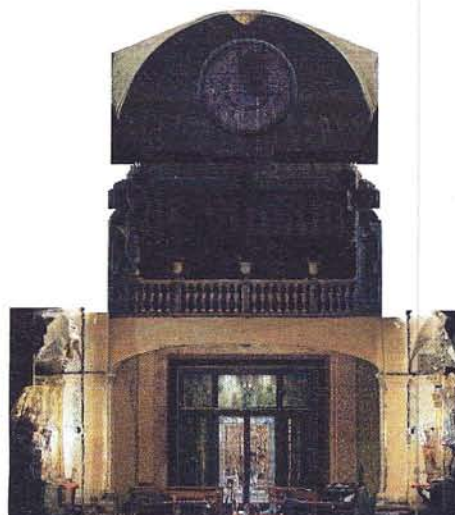
propiedades más importantes con las que cuenta este modelo tridimensional son: por un lado, la precisión métrica con la que está desarrollado, aproximadamente 3cm. Por otro lado, la reproducción de las formas del edificio y de todo su contenido en el modelo virtual, realmente se desarrolla con un gran detalle, gracias a su carácter tridimensional y a la reproducción fidedigna de la apariencia de sus materiales a partir del color que tiene asociado cada uno de los puntos que lo definen (Ullrich et al., 2001) (Fig. 4).

Al disponer de las coordenadas para cada punto del modelo, podemos obtener cualquier tipo de información en 2D que permite extraer las medidas del edificio. Por ejemplo, podemos obtener una planta (Fig. 5), una planta de cubiertas (Fig. 6), una sección longitudinal o transversal (Fig. 7) ya que es un proceso inmediato. Esta aplicación, que en la escala de arquitectura, permite contar con una cuantificación métrica del edificio muy detallada, se puede utilizar para estudiar el estado de conservación de la obra y de su estructura.

También se puede aplicar a los distintos retablos de la iglesia (Fig. 8), siendo de especial relevancia el retablo principal. Esta pieza tan singular de la iglesia de Sant Sever, puede ser perfectamente reproducida en una vista ortogonal de tipo frontal, que no es otra cosa que su alzado (Fig. 9). Lo que permite tener una descripción métrica completa de todo su contenido,



6



7

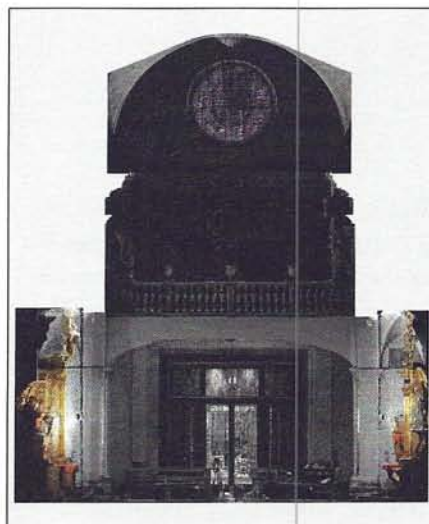
este tipo de representación es semejante a la ortofotografía.

Por otro lado el modelo 3D también puede ser utilizado para elaborar vistas tridimensionales del conjunto o de cualquiera de sus partes, con cualquier punto de vista y con cualquier tipo de proyección. Es decir, en perspectiva cónica (Fig. 10) o en axonometría (Fig. 4) y desde posiciones reales o ficticias. Además, la ventaja de este tipo de vistas es que pueden ser estáticas o desarrollarse con movimiento reproduciendo cualquier tipo de secuencia.

Un levantamiento tridimensional mediante un sistema láser, con las características que se han descrito, como en el caso de la iglesia de Sant Sever o en cualquier otro, demuestran la eficacia, la rapidez, y la precisión de la información que se puede obtener de un edificio complejo. La calidad y la cantidad de la información que se puede extraer con este sistema, definitivamente permite realizar valoraciones cuantitativas y cualitativas exhaustivas del objeto tratado.

En este sentido, la posibilidad de ver simultáneamente, a escala, con los colores de los materiales, y en tres dimensiones, la arquitectura y los retablos que contiene, nos permite percibir la relación tan íntima que existe entre estos dos elementos tan característicos de la arquitectura del *siglo XVIII*. Una relación, que por la escala y el tamaño con el que se desarrollan en Sant Sever, permite descubrir, como la arquitectura se convierte definitivamente en aquel el espacio en el que se desarrolla el retablo como el verdadero protagonista de la escena. Es más, se entiende cómo el retablo sin la arquitectura del edificio que lo contiene no tiene sentido, y al mismo tiempo, cómo el espacio de la arquitectura sin retablos queda inerte.

8. Visualización de datos en proyección ortogonal. Lámina de vistas ortogonales con especial incidencia gráfica en los retablos de la capilla. Esta lámina es una de las ocho que se mostraron en la exposición de retablos "L'Art del retaule a Catalunya" en el Museo de Arte de Girona durante el último semestre del 2006.



EL ESPACIO DEL RETABLO EN LA ARQUITECTURA. LA IGLESIA DE SANT SEVER EN BARCELONA
MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL GRÁFICA DE ELEMENTOS DEL PATRIMONIO CULTURAL

EL ESPACIO DEL RETABLO EN SU CONTEXTO ARQUITECTÓNICO
1.- SECCIÓN TRANSVERSAL. ALZADO HACIA LA ENTRADA. 2.- SECCIÓN TRANSVERSAL. ALZADO HACIA EL ALTAR
3.- SECCIÓN LONGITUDINAL. ALZADO IZQUIERDO

ANDRÉS DE MESA GISBERT



JOAQUÍN REGOT MARIMÓN



9. Vista del retablo en alzado frontal. Trazado gráfico y determinación métrica a partir de los datos obtenidos por el escáner.

10. Posibilidades de visualización tridimensional en perspectiva. Imagen creada mediante nubes de puntos que conforman el espacio arquitectónico de los retablos de la iglesia de Sant Sever.



Agradecimientos

La utilización del escáner láser Riegl LMS-Z420i para realizar este trabajo ha sido posible gracias a la cesión del aparato por parte del Centre de Polítiques del Sòl i Valoracions que dirige el catedrático Josep Roca Cladera y a su Laboratori de Modelat Virtual de la Ciutat.

Agradecemos los consejos prácticos y el asesoramiento técnico brindado por el Sr. Alejandro Marambio para la suma de las diferentes nubes de puntos de este trabajo. Y a Ernest Redondo por su aportación al gráfico del retablo con los dibujos de las imágenes.

Referencias

- ALMAGRO, A., *El levantamiento arquitectónico*, Universidad de Granada, Granada, 2004, pp. 300.
- ARIAS, P., ORDÓÑEZ, C., LORENZO, H., HERRAEZ, J., ARMESTO, J., "Low-cost documentation of traditional agro-industrial buildings by close-range photogrammetry", *Building and environment*, 42, 2007, pp. 1817-1827.
- BALTSAVIAS, E.P., "A comparison between photogrammetry and laser scanning", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 1999, pp. 83-94.
- BULL, F., NÚÑEZ, M.A., RODRIGUEZ J.J., *Fotogrametría arquitectónica*, Edicions UPC, Barcelona, 2007, pp. 201.
- CRAMER, J., *Levantamiento topográfico en la construcción*, Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1986.
- NÚÑEZ M.A., BULL F., "Aplicación del láser escáner terrestre para levantamientos arquitectónicos, arqueológicos y geotécnicos", *Mapping*, 124, 2008, pp. 46-49.
- PAVLIDIS, G., KOUTSOUDIS, A., ARNOUTOGLU, F., TSIOLIKAS, V., CHAMZAS, C., "Methods for 3D digitization of Cultural Heritage", *Journal of Cultural Heritage*, 8, 2007, pp. 93-98.
- Reference Guide of PolyWorks v.10. InnovMetric Software Inc. 2014 Cyrille-Duquet, Suite 310 Québec, QC Canada.
- Riegl Laser Measurements Systems GmbH. Laser Mirror Scanner LMS-Z210 Technical documentation. and User's Instructions. http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/lms-z420i/_420i_all.htm (acceso 15 Mayo 2008)
- ULLRICH, A., REICHERT, R., SCHWARZ, R., RIEGL, J., "Time-of-flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing", En: *Optical 3-D Measurement Techniques V*, Viena, 2001.